

創作ノート

立体音響作品《Studies No.1 for Aleatoric Coded Voxels》について
Spatial Sound 《Studies No.1 for Aleatoric Coded Voxels》

藤村 勇里

Yuri FUJIMURA

東京工科大学

Tokyo Univ. of Tech.

伊藤 彰教

Akinori ITO

東京工科大学

Tokyo Univ. of Tech.

概要

本作品は、7.1.4ch マルチスピーカーを用いた電子音響作品である。マルチスピーカー再生によって拡張された定位表現において、空間全体を一つの大きなモノラル音場として捉え、単発音による定位感と持続音による包まれ感の両立を試みた。人間の音響知覚特性を着想とし、定位知覚を考慮した音色選定やパンニングを施すことで立体音響表現の探究を図った。本稿では、サウンドプログラミングによる音色制作、Dolby Atmosを用いた音の配置について述べる。

1. 作品概要

マルチチャンネルスピーカー環境下における音の定位と広がり感を着想に、7.1.4ch の立体音響空間を独立した点音源の集合体としてではなく、空間全体を一つの大きなモノラル音場として捉え直し、聴取空間を濃密な響きで満たすことを試みる。本作では鋭いアタックを持つ単発音と持続的に変化する持続音が対比的に扱われ、単発音は空間に浮かぶ粒子のように点在して明確な定位を示し、持続音はピッチや音量に自然現象のようなランダム性を帯びて空間を漂う。固定的な定位を離れ、絶えず推移する音響群によって空間の隅々までを音で浸し、聴き手を響きそのもので包み込む作品である。

2. 音の知覚特性を考慮した音色設計

音源の制作には音響合成環境である SuperCollider と Csound を使用し、一部に水中マイクによる録音素材を用いた。制作の指針として、音の知覚特性を考慮した。音の定位では、純音は定位しにくく、多くの周波数成分を含む音は定位しやすいという特性が知られている(廣瀬 1993)。各音色を定位が明確な単発音、空間を満

たす持続音、奥行きや質感を提示する Particle Sound の3つに分類して設計を行った。

2.1. 単発音

単発音は、楽曲のリズム構造を提示すると同時に、定位を強調する役割を担う。水平方向の定位は、主に両耳間時間差 (ITD) と両耳間レベル差 (ILD) によって知覚される (Blauert 1997 140-155)。ITD は約 1.5kHz 以下の低周波数帯域で有効であり、ILD は波長が頭部のサイズより短い高周波数帯域で顕著となる。一方、前後や仰角方向の定位には、頭部伝達関数 (HRTF) に由来するスペクトルキューが主要な手がかりとなる。音源の仰角変化に伴い、6kHz から 10kHz 付近に生じるスペクトルノッチやピークの推移が高さ知覚を決定づける (Shaw and Teranishi 1968)。また、周波数成分と定位精度の関係について、7kHz 以上の成分を含む音は正確な方向判断が可能である一方、それ以下の成分しか持たない音では大きな判断誤差が生じる。さらに純音では、音源の周波数が高いほど知覚される音像位置も高くなる傾向がある (Roffler and Butler 1968)。以上の知見に基づき、各音色を設計した。定位しやすい音では、正確な方向判断に必要とされる 7kHz~12kHz 以上を含むホワイトノイズやパルス音、12kHz の三角波を用いた。定位しにくい音では 300Hz 以下の正弦波を用いた。Csound を用いて制作した音色 5 は発音ごとにピッチをランダムに変化させ、12ch のスピーカーからランダムに出力することで、定位感と広がり感の両立を試みた。

2.2. 持続音

持続音は、空間全体を満たす役割を担う。音像の空間的な広がりに関する性質は一般的に広がり感 (Spaciousness) と呼ばれる。音像の空間的な広がりとは代表的

表 1: 単発音の音色リスト

音色リスト「単発音」	周波数	定位感
1 : sin wave	300Hz以下	低
2 : pulse + reverb	full range	強
3 : white noise + reverb + filter	7kHz以上を主成分	中
4 : triangle wave + reverb	12kHz	強
5 : marimba(Csound)	random pitch	中

に ASW(みかけの音像幅) と LEV(包まれ感) の二つがある。ASW は先行音(直接音)の到来方向に先行音と時間的にも空間的にも融合して知覚される音像の大きさを表す。LEV は ASW 以外の音像によって、聴き手のまわりが満たされていることを表す(森本ほか 1990)。LEV を「水平方向が音に満たされた感じ」と「上部空間が音に満たされた感じ」に分ける考えもある。これに加え、上部空間に音が広がって満たされなくても上方に音を感じれば大きくなる感覚と定義する「上方に音を感じる程度」という性質もある。上部空間が音に満たされた感じと上方に音を感じる程度は主に後期上方反射音、水平方向が音に満たされた感じは主に後期側方反射音が関係する(羽入ほか 2012)。以上の知見に基づき、各音色を設計した。本作の持続音においては、ASW よりも LEV の最大化を意図し、全ての音源を 12 チャンネル個別に生成した。同一の音源を用いたファントム音像の形成を避けることで定位感を弱めた。水平方向と上部空間の LEV を効果的に出すため、スピーカーの配置に応じた周波数の帯域制限を行った。ハイトスピーカーには高域成分を割り当て、サラウンドスピーカーに中低域を割り当てることで全方位的な広がり感を目指した。また、ピエゾマイクを用いて録音した水中の音響素材を用いた。機械的・電気的な音との対比としてアコースティック音を提示することで、作品に異なる質感を与えることを意図した。

表 2: 持続音の音色リスト

音色リスト「持続音」	周波数(surround)	周波数(high)
6 : pink noise + filter	400Hz-2kHz	1kHz-9kHz
7 : sin wave + FM	250Hz-700Hz	250Hz-700Hz
8 : sine wave + FM + AM	200Hz-1kHz	1kHz-7kHz
9 : water(piezo recording)	中低域	高域

2.3. Particle Sound

Particle Sound は、空間の奥行きや遠近、質感を表現する役割を担う。持続音が持続的なエンベロープによって空間の広がり感を作るのに対し、パーティクルサウンドは短い時間の音を確率的かつ連続的に発生させることで、点描的な音の密度を作り出す。持続音と同様に、全ての音源を 12 チャンネル個別に生成した。

同一の音源を用いたファントム音像の形成を避けることで、特定の定位感を弱め、空間全体に微細な音の粒子が充満しているような、動的で複雑な包まれ感を意図した。パルス音、正弦波、三角波を連続的に発音させることで持続音とは異なった音響空間を提示した。パルス音にはランダム発音と深めのリバーブ、正弦波には連続的な発音と深めのリバーブをかけることで、音の輪郭を滲ませ、スピーカーより遠くまで広がる空間を意図した。三角波には連続的な発音と浅めのリバーブをかけ、ハイトとサラウンドで周波数の帯域を分けることでより近くで知覚される音響として提示した。また、Csound の物理モデリングによる竹の音を用いることで三角波とは対照的に音色が柔らかくなり、電子的な空間に有機的な質感を与えることを意図した。

表 3: Particle Sound の音色リスト

音色リスト「Particle Sound」	周波数
10 : pulse + white noise + long reverb	full range
11 : triangle wave + reverb + filter	1kHz-5kHz(surround) 7kHz-10kHz(high)
12 : sin wave +reverb	700Hz-7.5kHz
13 : bamboo(Csound)	中低域

3. マルチスピーカーシステムによる空間音響設計

制作に使用したシステムは、Dolby Atmos の公式フォーマットに準拠したスピーカー半径 102cm、サラウンドスピーカーの高さ 120cm、7.1ch サラウンド(L/R±30度、Ls/Rs±100度、Lrs/Rsr±150度)に、ハイトスピーカーを方位±45度/±135度、仰角 45度、スピーカー距離 102cm として計 4ch 追加した 7.1.4ch のスピーカーシステムである。水平サラウンドスピーカーに Genelec 8330A、ハイトスピーカーに Genelec 8320A、サブウーファーに Genelec 7050B を使用した。



図 1: 本制作で使用した 7.1.4ch 立体音響システム

3.1. Dolby Atmos を用いた空間音響構成

音源の空間配置は Dolby Atmos を用いた。Dolby Atmos は Bed と呼ばれる 7.1.2ch 構成のトラックと Object と呼ばれるパンニング情報などのメタデータを擁した最大 118ch のトラックからなる最大 128ch の、チャンネルベースとオブジェクトベースを組み合わせたフォーマットである。本作では、チャンネルベース 7.1ch に加え、4つのオブジェクトトラックをハイトスピーカーにあらかじめ固定して割り当てる構成とした。一般にオブジェクトベースオーディオは、音源を自由に移動させるパンニング表現に優れているが、本作品ではオブジェクトの動的な移動を多用せず、主にチャンネルベースを中心に設計した。特定の聴取位置でのみ成立する定位感を避け、空間全体を一つの大きなモノラル音場、あるいは環境的な音響空間として提示するためである。

3.2. 音色の組み合わせによる空間音響表現

制作した各音色を配置・組み合わせることで、楽曲展開ごとに異なる空間表現を目指した。立体音響の知覚には、HRTF が深く関与しており、特に仰角方向の定位精度は個人差や再生環境、HRTF に由来する周波数特性の変化によって違いが生じる。仰角方向の音像定位には、耳介によるスペクトルの手がかりに強く依存しており、音の持続時間やスペクトル構造が不十分な場合には定位精度が低下する (Macpherson and Sabin 2013)。そのため、楽曲の前半では音色 12 を用いて仰角方向へ注意を向けさせた。音色 12 を持続音である音色 6 と重ねることで、水平方向のみならず仰角方向を含めた空間全体の広がり感を提示し、作品の基底となる音響空間を構築した。音色 11 は広がり感とは対照的に音が聴取者の近くで知覚されるドライな質感であり、導入部と対比することで、空間の遠近を演出した。音色 10 は広がり感と奥行きを強め、近さを演出する音色 11 と交互、あるいは重ねて提示することで、空間の奥行きと広がり感、遠近を動的に変化させた。楽曲の中盤では、水中を録音した音色 9 と物理モデリングを利用した音色 13 を用いることで、電子音から有機的な質感を対比させ、音響空間の質感にコントラストを生み出した。楽曲の後半では、前半の広がり感の提示から一転し、リズム要素を含む単発音を含めることで音響的な密度を高め、定位知覚を主軸とした構成とした。音色 5 は発音ごとにピッチをランダムに変化させ、12ch のスピーカーからランダムに出力されるため、高音域は定位感を強める一方、低音域では方向判断の曖昧さを利用して空間全体の広がりを補強する。持続音である音色 7 と音色 8 を段階的に加えることで、定位知覚が優位に働く場面と、広がり感が優位に働く場面との間にグラデーションを持たせた。最後に、再度

リズムフレーズを設けることで、楽曲全体の盛り上がりの最高地点を持ってくると同時に、本作で目指した定位感と広がり感の両立を音数を密にした状態で提示した。

表 4: 楽曲展開に基づいた音色の組み合わせと空間表現

音色の組み合わせ	意図した空間表現
音色6 + 音色12	広がり感、仰角方向への注意
音色11	質的变化・対比
音色10 + 音色11	奥行き
音色9 + 音色10	質的变化・対比
音色10 + 音色13	奥行き、質的变化・対比
音色13 + 単発音(リズム)	定位感、広がり感
音色5 + 音色13	定位感、広がり感
音色5 + 音色7	定位感、広がり感、質的变化・対比
音色5 + 音色7 + 音色8	定位感、広がり感、仰角方向への注意
音色5 + 音色7 + 音色8 + 単発音(リズム)	定位感、広がり感

4. まとめ

7.1.4ch マルチスピーカー環境を用いた電子音響作品《Studies No.1 for Aleatoric Coded Voxels》の創作を通じて、音響知覚特性に基づいた音色設計と Dolby Atmos フォーマットを用いた空間音響表現を試みた。空間全体を一つの大きなモノラル音場として捉え直し、チャンネルベースを主体とした音源配置を行うことで、特定のスイートスポットに依存しない、環境的な没入感の構築を目指した。音色制作では音響知覚を取り入れ、単発音、持続音、パーティクルサウンドと分類した上でサウンドデザインを行った。本作で実践した、音色の周波数特性や時間的構造そのものを空間の手がかりとするアプローチは、単なるパンニング操作とは異なった、密度と質感のある音響空間の構築に有効であると言えるだろう。また、鋭い定位感を持つ単発音と空間を満たす持続音を意図的に提示することが可能となり、マルチスピーカーを用いた空間表現の新たな可能性を示すことができたと考える。本研究は音楽作品創作を通じた主観的な実践であり、設計した音色が聴取者に対して意図通りの空間知覚をもたらしたかについての定量的な検証は行っていない。今後はこの研究創作から発展させ、音色や空間配置の手法に基づき、聴取位置による知覚の差異や、音響知覚に基づいた音色設計が空間知覚に及ぼす影響について印象評価実験を実施し、客観的なデータに基づいた更なる調査を行っていくことを計画している。

5. 参考文献

- Blauert, J. 1997. *Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press 140-155.

羽入敏樹 星和磨 佐藤瑠美. 2012. 「音楽ホールにおける後期上方反射音をもたらす空間印象」『日本音響学会誌』 69 (1) 7-15.

廣瀬通孝. 1993. 「聴覚的臨場感の合成と人工現実感」『人間工学』 29 (3) 135-139.

Macpherson, E., and Sabin, A. 2013. Vertical-plane sound localization with distorted spectral cues. *Hearing Research*, 306 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.09.007>

森本政之 藤森久嘉 前川純一. 1990. 「みかけの音源の幅と音に包まれた感じの差異」『日本音響学会誌』 46 (6) 449-457.

Roffler, S. K., and Butler, R. A. 1968. Factors that influence the localization of sound in the vertical plane. *Journal of Acoustical Society of America*, 43 (6) 1255-1259.

Shaw, E. A. G., and Teranishi, R. 1968. Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source. *Journal of Acoustical Society of America*, 44 (1) 240-249.



この作品は、クリエイティブ・コモンズ の表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂くか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。

6. 著者プロフィール

藤村 勇里 (Yuri FUJIMURA)

東京工科大学メディア学部4年。オーディオエンジニアリングとサウンドデザインを学び、ゲームサウンドの作曲・効果音制作から、マルチスピーカーやサウンドプログラミングを用いた立体音響作品まで幅広く制作。研究ではREAPERとTouchDesignerを用いた映像と音響を同期させるインタラクティブシステムの開発を行う。

伊藤 彰教 (Akinori ITO)

慶應義塾大学環境情報学部卒。東京藝術大学音楽研究科後期博士課程修了。博士(学術)。東京工科大学メディア学部助手などを経て、東京工科大学メディア学部特任講師。コンピュータ音楽、サウンドデザイン、シネマ&ゲームオーディオ制作技術などの研究に従事。AES正会員。芸術科学会、日本デジタルゲーム学会理事を歴任。